

IL MOTO ESTERNO

Per **moto esterno** si intende quella parte della fluidodinamica che studia il moto dei fluidi attorno ai corpi.

Tipicamente il moto esterno si occupa di tutti quei casi in cui il fluido non è più l'acqua, ma l'aria, che soffiando investe i corpi.

Questi fluidi in moto esercitano **forze** verticali ed orizzontali contro i corpi, dette **forze di trascinamento**; tali forze dipendono dalla **viscosità** del fluido.

Lo studio del moto esterno permette per esempio di:

- determinare la forza di trascinamento;
- dimensionare le strutture in modo che resistano alla spinta del vento;
- calcolare la velocità di caduta di un oggetto nell'aria o in un fluido;
- determinare la forma ottimale di una copertura;
- determinare la forza necessaria da imprimere a un corpo per metterlo in movimento e quindi vincere la forza di attrito dell'aria.

Alla base dello studio del moto esterno vi è il **Paradosso di D'Alambert**.

Il paradosso di D’Alambert

Ipotizziamo il caso di un generico moto esterno con un **fluido ideale** privo di **viscosità ($\mu=0$)**.

L’enunciato di D’Alambert sostiene che:

Un fluido con viscosità nulla, a contatto con un corpo di forma simmetrica, non esercita su di esso nessuna forza.

Tuttavia quanto enunciato da D’Alambert si discosta da ciò che succede nella realtà, poiché qualsiasi fluido ha viscosità, e quindi genera sempre forze utili o frenanti.

Per comprendere il paradosso di D’Alambert analizziamo più nel dettaglio la velocità del fluido attorno al corpo.

Supponiamo che un fluido scorra contro un corpo simmetrico, come per esempio un cilindro.

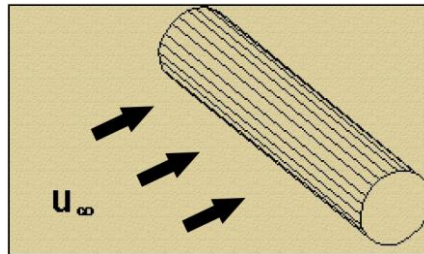


Fig.1 - Fluido che scorre con profilo di velocità piatto, a velocità u_∞ , contro un corpo cilindrico.

Se il fluido arriva con un profilo di velocità piatto con la stessa velocità u_∞ in tutti i punti, nel momento di interazione con il corpo la velocità sarà:

- nulla a contatto con la superficie del corpo;
- in generale diversa da u_∞ nell’intorno del corpo.

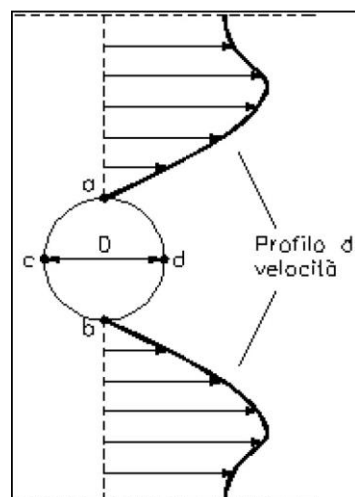


Fig.2 - Profilo di velocità del fluido che interagisce col corpo.

Questo fenomeno risulta evidente nella Fig.2: tracciando il **profilo di velocità**, notiamo che a una certa distanza dal corpo il fluido continua a scorrere con profilo di velocità piatto u_∞ senza subire influenze, mentre nella

zona di influenza del corpo, delimitata dal cosiddetto **strato limite**, il fluido ha velocità sensibilmente diversa da u_∞ .

In particolare, nella zona dello **strato limite** la velocità del fluido:

- è **maggiore di u_∞ nell'intorno del corpo**;
- è **nulla a contatto con la parete del corpo** (per l'ipotesi di aderenza).

Perciò nell'intorno del corpo abbiamo un consistente **gradiente di velocità**, che si traduce, in presenza di viscosità, in sforzi tangenziali τ , cioè vettori di **forze tangenziali** che tendono a trascinare il nostro corpo.

Tuttavia, l'aria che soffia su un corpo produce anche uno **sforzo radiale** (normale alla superficie del nostro corpo), cioè una **pressione**.

Anche in assenza di viscosità del fluido, la zona esposta al flusso, denominata **punto di ristagno** (che nel disegno è il punto **c**), subisce un aumento di pressione rispetto alla pressione media dell'aria (1 Bar), perché il fluido che investe il corpo converte la propria energia cinetica in **energia potenziale di pressione**.

L'aumento di pressione nel punto di ristagno è chiamata **sovrappressione di ristagno**.

Viceversa, il fluido, nei punti **a** e **b**, ha velocità altissima e sta acquistando energia cinetica;

Se nei punti di velocità u_∞ l'energia cinetica del fluido era $\frac{u_\infty^2}{2}$, nei punti **a** e **b** l'energia cinetica sarà maggiore (essendo in funzione del quadrato della velocità).

È da notare che, poiché l'energia non si crea dal nulla, l'aumento di energia cinetica che si verifica all'intorno è generato dalla diminuzione dell'energia potenziale di pressione, quindi nei punti **a** e **b** la pressione sarà minore rispetto alla pressione atmosferica (e si crea come un effetto di risucchio).

Spostandoci sulla parte posteriore del corpo, torniamo ad avere, nel punto **d**, un nuovo punto di ristagno e conseguentemente una riconversione dell'energia cinetica in energia potenziale di pressione.

Quindi, quando la vena fluida si richiude, si crea, sul retro del corpo, una sorta di "vortice di coda", poiché l'energia cinetica, che in precedenza era cresciuta con l'aumento della velocità, si riconverte in pressione e si ha così una contropinta dell'aria sul retro del corpo.

Se il fluido è ideale, cioè privo di viscosità e attriti, il nuovo aumento di pressione che avviene sul retro del corpo è uguale alla crescita di pressione che è avvenuta nel punto **c**.

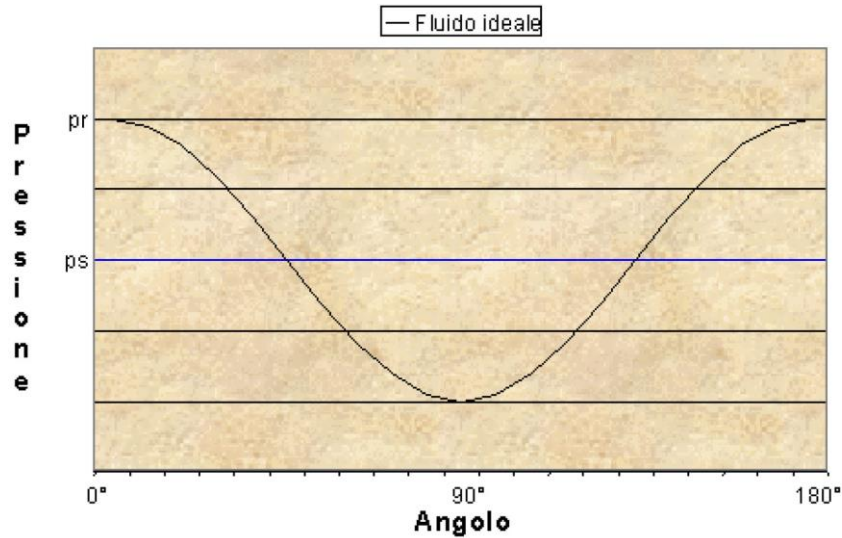


Fig.3 - Diagramma delle pressioni per un fluido ideale.

Sul **diagramma delle pressioni**, possiamo osservare l'andamento delle pressioni, in funzione dell'angolo, lungo la semicirconferenza **cad**:

- nel punto **c** ho la pressione di ristagno, maggiore della pressione atmosferica;
- nel punto **a** (o **b**) ho la pressione minima, la massima velocità e la massima energia cinetica;
- nel punto **d** ricresce la pressione di ristagno ai livelli di **c**.

Questo diagramma delle pressioni, applicato alla circonferenza **cad**, ha una **risultante nulla**, ed ecco dimostrato il paradosso di D'Alambert.

Nella realtà, come detto, ogni fluido ha una viscosità e perciò subisce delle perdite per attrito. Perciò:

- la ripresa di pressione nel punto **d** non sarà mai completa;
- il diagramma delle pressioni non sarà più simmetrico;
- la risultante degli sforzi non sarà più nulla, ma si creerà uno **sforzo risultante complessivo** che tenderà a trascinare il corpo nel verso di scorrimento del fluido.

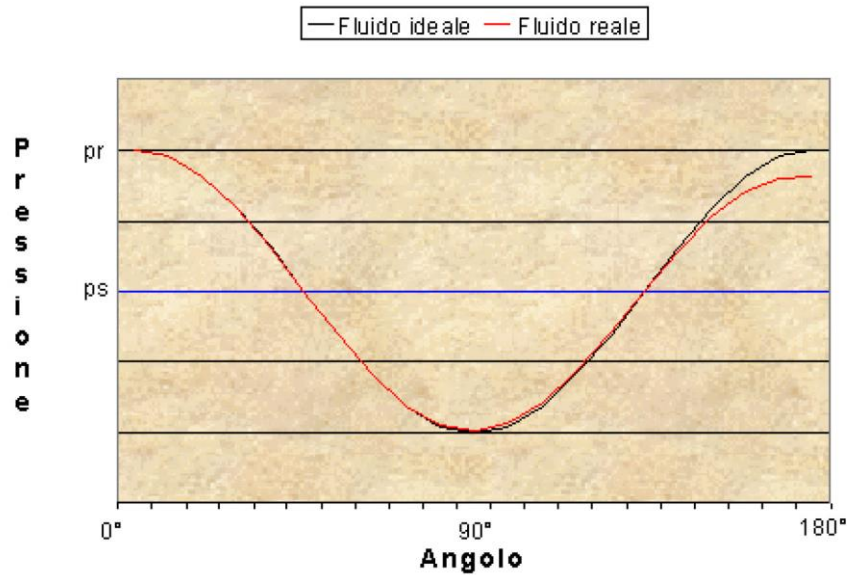


Fig.4 - Confronto tra il diagramma delle pressioni di un fluido ideale e uno reale.

Lo sforzo compressivo, misurato in Newton, è chiamato appunto **forza di trascinamento**.

La forza di trascinamento

Lo studio sul moto esterno ha, come obiettivo principale, la quantificazione della **forza di trascinamento**.

La forza di trascinamento è data dalla risultante complessiva di una componente di **sforzi normali**, cioè di pressione, e da una componente di **sforzi tangenziali** legati al gradiente di velocità che si verifica nello strato limite.

C'è da ricordare che un edificio, un traliccio, un palo della luce o un ponte sono corpi fissati a terra, e perciò risentono solo parzialmente della forza di trascinamento.

Nonostante la forza di trascinamento non sposti il corpo, a livello statico si verificherà uno sforzo distribuito lungo tutta la sua lunghezza, che tenderà a fletterlo, romperlo o sradicarlo ed è perciò importante dimensionare la struttura in modo da renderla resistente alle azioni meccaniche che tendono a deformarla.



Relazione causa-effetto che determina la forza di trascinamento

La forza resistente, o **forza di trascinamento**, è espressa in **Newton** ed è data da:

- densità dell'aria ρ ;
- **coefficiente di resistenza** (che dipende dalla forma del corpo ed è tabellato), detto coefficiente aerodinamico o di penetrazione aerodinamica ed indicato con **Cr** o **Cf**;
- velocità all'infinito del fluido u_∞ (nella formula la $\frac{u_\infty^2}{2}$ rappresenta l'energia cinetica portata dal vento);
- **area frontale** del corpo **Af** (da non confondersi con la superficie complessiva).

$$F_r = \rho \cdot C_r \cdot A_F \cdot \frac{u_\infty^2}{2} \quad (1)$$

NB: nella (1), $\rho \cdot C_r \cdot \frac{u_\infty^2}{2}$ rappresenta la pressione (in Pascal) con cui il vento spinge contro l'edificio. Se poi moltiplico questa pressione per l'area frontale del corpo **Af** ottengo la **forza** in Newton che spinge contro il mio edificio (la tipica azione orizzontale del vento che spinge contro una struttura).

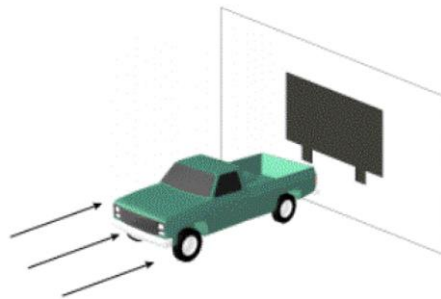


Fig.5 - Area frontale di un'automobile.

Poiché il coefficiente di resistenza è strettamente legato alla **forma del corpo** esistono migliaia di tabelle che contengono i grafici del **Cr** per le più svariate forme, ma noi prendiamo in considerazione solo tre casi:

- **la superficie piana, con Cr =1;**
- **il cilindro;**
- **la sfera.**

Il Cr è fornito in funzione del **numero di Reynolds**.

Come si vede dal grafico c'è una regione di bassi numeri di Reynolds dove le curve scendono molto velocemente, seguita da una zona di moto turbolento in cui i valori sono quasi piatti e infine da una zona di moto laminare in cui c'è una forte decrescita del coefficiente di resistenza **Cr** al crescere del numero di Reynolds.

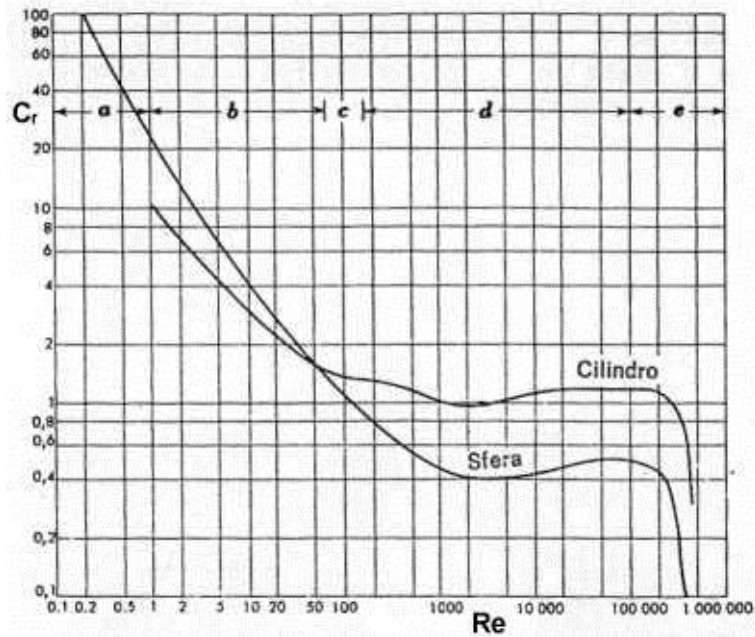


Fig.6 - Diagramma del C_r per sfera e cilindro.

Per corpi dalla forma irregolare può essere complicato calcolare il C_r . Un esempio sono i **corpi di forma alare**.

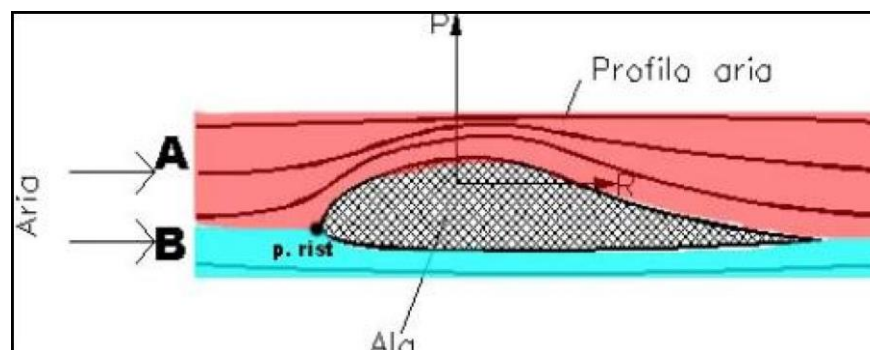


Fig.7 - Andamento del fluido attorno un corpo di forma alare.

L'aria, per superare un corpo di forma alare, compierà un percorso curvo al di sopra e rettilineo al di sotto: pertanto, sopra al corpo avremo una depressione (dovuta all' aumento di velocità), mentre sotto al corpo avremo una pressione uguale a quella atmosferica. Si generano così delle forze che vanno dal basso verso l'alto, dette **forze di portanza**.

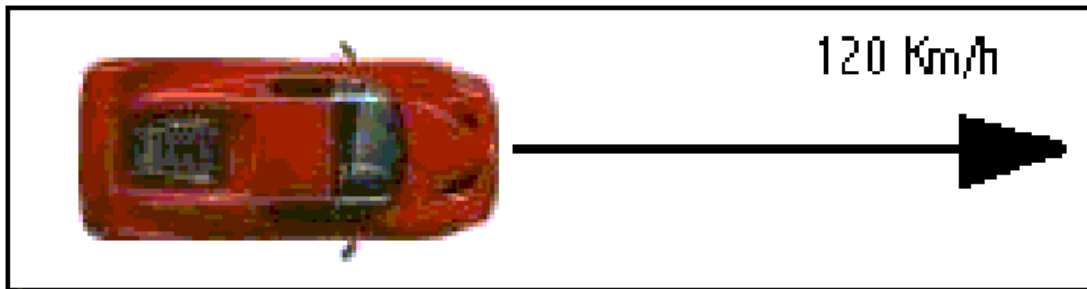
La forza di portanza è generalmente pari a circa 4 o 5 volte la forza di resistenza.

$$F_p = \rho \cdot C_p \cdot A_F \cdot \frac{u_\infty^2}{2} \quad (2)$$

Siccome è la forma che determina la forza, l'architetto deve valutare molto attentamente quale forma dare alla propria struttura per renderla resistente alle spinte del vento.

ESERCIZI

ES.1 Si consideri un'automobile portata alla velocità costante di 120 chilometri orari. Si calcoli la potenza che il motore deve erogare per mantenere tale velocità. Trascurando le forze di attrito di rotolamento, sappiamo che l'area frontale A_F della vettura è pari a 1.8 metri quadrati e il coefficiente di attrito a 0.34.



RISOLUZIONE

Dati: $u = 120 \text{ km/h}$, $A_F = 1.8 \text{ m}^2$, $C_r = 0.34$

Facendo riferimento alle tabelle è possibile risalire alla **densità di massa** e alla **densità cinematica** del fluido, che nel nostro caso è l'aria:

$$\rho_{\text{ARIA}} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \text{ (temperatura ambiente)}$$

Possiamo dunque calcolare la **forza di trascinamento** dalla formula:

$$F_T = \rho_{\text{ARIA}} \cdot C_r \cdot A_F \cdot \frac{u_\infty^2}{2} = 1.2 \cdot 0.34 \cdot 1.8 \cdot \left(120 \cdot \frac{1000}{3600}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} = 408 \text{ N}$$

Occorre ora trasformare questa forza, necessaria a vincere la componente aerodinamica degli attriti, nella corrispondente **potenza erogata**, ricordando che **un lavoro equivale a una forza per uno spostamento e la rispettiva potenza è un lavoro nel tempo**.

Basta quindi moltiplicare la **forza di trascinamento** per la **velocità costante dell'automobile**:

$$P = F_r \cdot u = 408 \cdot \left(120 \cdot \frac{1000}{3600}\right) = 13600 \text{ W} = 18.5 \text{ CV}$$

ricordando che un cavallo a vapore equivale a **735 Watt**.

Nella realtà, l'attrito aerodinamico è, a queste velocità, ben inferiore dell'attrito totale: il maggior contributo alla resistenza al moto è fornito infatti dall'**attrito di rotolamento**, che è nel nostro caso è stato trascurato. Nella

realità al motore sarà allora richiesta una potenza effettiva di **40-45 CV** di cui 20-25 per vincere l'attrito di rotolamento.

Provando a portare la macchina a una velocità costante di 180km/h si ottiene:

$$F_r = \rho_{\text{ARIA}} \cdot C_r \cdot A_F \cdot \frac{u_\infty^2}{2} = 1.2 \cdot 0.34 \cdot 1.8 \cdot \left(180 \cdot \frac{1000}{3600}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} = 918\text{N}$$

$$P = F_r \cdot u = 918 \cdot \left(180 \cdot \frac{1000}{3600}\right) = 45900\text{W} = 62.45\text{CV}$$

In queste nuove condizioni, l'attrito aerodinamico contribuisce al più della potenza richiesta al motore, in quanto l'attrito di rotolamento resta costante. In particolare, se esso dissipa ancora 20-25 CV, si ha che la **potenza effettiva** è circa **87.5 CV**.

Se poi si vogliono raggiungere velocità maggiori, bisogna operare sulle due forme di attrito:

- riducendo lo spessore delle ruote (riducendo di conseguenza l'attrito di rotolamento ma perdendo in stabilità);
- riducendo l'**area frontale** o il coefficiente **Cr**.

In ogni caso, a velocità elevate diventa determinante la componente aerodinamica, più ancora di quella dovuta al rotolamento e persino ancor più della potenza.

ES.2 Trovare la velocità di caduta di una gocciolina di pioggia (considerata idealmente sferica) del diametro di 5 mm.

RISOLUZIONE

La gocciolina, supposta inizialmente ferma, comincia la sua caduta sotto l'azione della sola **forza peso** F_G mentre la **forza di trascinamento** F_T , proporzionale alla velocità, è nulla.

Successivamente la velocità di caduta aumenta per l'azione della F_G costante, ma di conseguenza anche la F_T , ora non più nulla, cresce opponendosi al moto e facendo calare quindi l'accelerazione.

Infine, all'equilibrio, la goccia ha raggiunto una velocità tale che la forza di trascinamento pareggia perfettamente la forza peso; il suo moto diventa dunque **rettilineo uniforme** per il primo principio della dinamica.

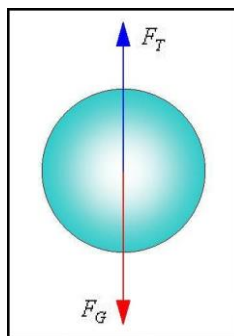


Fig.9

Per risolvere il problema basterà quindi calcolare la **forza peso** e uguagliarla a quella di trascinamento. La massa della gocciolina è

(ricordando che $V_{SFERA} = \pi \cdot \frac{D^3}{6}$):

$$M = \rho_{H_2O} \cdot V_{SFERA} = 1000 \cdot \pi \cdot \frac{0.005^3}{6} = 6.545 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

da cui si ricava (**g**=accelerazione di gravità) :

$$F_p = g \cdot M = 9.81 \cdot 6.545 \cdot 10^{-5} = 64.2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

Ma essendo a regime $F_p = F_T$ e $F_T = \rho_{ARIA} \cdot C_r \cdot A_F \cdot \frac{u^2}{2}$, si può ricavare

l'espressione per la velocità di caduta:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{\rho_{ARIA} \cdot C_r \cdot A_F}} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{\rho_{ARIA} \cdot C_r \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 64.2 \cdot 10^{-5}}{1.2 \cdot C_r \cdot \pi \cdot \frac{0.005^2}{4}}}$$

essendo l'area frontale di una sfera il suo cerchio massimo (cerchio di diametro pari al diametro della sfera).

L'unico valore che resta da sostituire nella formula è **C_r**: esso si ricava grazie al **numero di Reynolds** attraverso il diagramma di Fig.9 per la sfera. Utilizzando come grandezza caratteristica il diametro D:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu_{ARIA}}$$

Ne consegue che **C_r**, da cui dipende l'incognita **u**, dipende a sua volta dalla velocità.

Per sbloccare questa situazione di "stallo" bisogna applicare un **metodo iterativo di risoluzione**: quando in un problema si ha un'incognita **A** espressa in funzione di una seconda grandezza **B** e, allo stesso tempo, si conosce di **B** solo una formula in funzione di **A**, è necessario **ipotizzare un valore plausibile dell'incognita A**, con cui ricavare in seguito **B**. Successivamente, si calcola nuovamente la prima grandezza ottenendo in generale un valore differente da quello ipotizzato concludendo il primo passo dell'iterazione.

Successivamente è possibile (nonché necessario) eseguire altri passi e, se il metodo applicato al caso particolare converge a una soluzione, si ottengono, dalle iterazioni successive, **risultati (ovvero valori di A) sempre meglio approssimanti la soluzione**.

Nel caso di una goccia di pioggia, si ritiene opportuno ipotizzare una velocità $u_1 = 1 \text{ m/s}$ con cui ricavare il numero di Reynolds **Re₁**:

$$Re_1 = \frac{1 \cdot 0.005}{17 \cdot 10^{-6}} = 294.1$$

Andando sul diagramma del C_r di una sfera ricavo, in corrispondenza dell'ascissa **Re1**, un valore $C_{r1} \approx 0.9$.

Ritrovo infine il secondo valore della velocità:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 64.2 \cdot 10^{-5}}{1.2 \cdot 0.9 \cdot \pi \cdot \frac{0.005^2}{4}}} = 7.78 \text{ m/s}$$

Che risulta non troppo lontano dalla previsione u_1 .

Si procede quindi ad un'altra iterazione:

$$\text{Re}_2 = \frac{u_2 \cdot D}{\nu} = \frac{7.78 \cdot 0.005}{17 \cdot 10^{-6}} = 2288$$

$$C_{r2} \approx 1.7$$

$$u_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot 6.42 \cdot 10^{-7} \cdot 4}{2 \cdot 1.2 \cdot \pi \cdot 0.0005^2}} = 1.79 \text{ m/s}$$

Tale valore coinciderà ormai con la soluzione, anche se per avere valori più precisi bisognerebbe procedere con un paio di ulteriori iterazioni.

Si nota inoltre che ci si è avvicinati al valore esatto approssimandolo dal di sotto e ciò rassicura sul buon esito del procedimento: si sta infatti seguendo lo stesso processo seguito dalla sfera, la cui velocità aumenta istante per istante sino a che non si stabilizza alla velocità di regime.

OSSERVAZIONI: Poiché, relativamente ai dati di questo esercizio, si sta lavorando in una regione del diagramma di Fig.6 particolarmente instabile per la forte decrescenza della curva (ginocchio della curva), nel caso di un valore iniziale elevato assegnato alla velocità, si sarebbe potuti giungere ad un'altra soluzione.

Per velocità eccessive si otterrebbe infatti un valore di C_r a destra del ginocchio della curva e quindi bassissimo. Questo, di riflesso, porterebbe a un valore ancora alto di velocità, innescando così un processo che darebbe una soluzione differente (in particolare maggiore) da quella trovata precedentemente.

Questa eventualità è possibile sebbene nella realtà fisica il fenomeno avvenga in una sola modalità.

Nel caso considerato si intuisce che la soluzione matematica che equivale al vero è quella a velocità inferiore (la prima): la goccia subisce un processo di aumento di velocità e si stabilizza di conseguenza sulla minore possibile (ovvero la prima incontrata) che garantisca l'equilibrio fra le due forze agenti su di essa.

ILLUMINOTECNICA

Cos'è la luce?

La luce, l'agente fisico che rende visibili gli oggetti, costituisce una piccola porzione dello spettro delle **radiazioni elettromagnetiche**.

È la sensazione determinata nell'occhio umano dalle onde elettromagnetiche comprese nell'intervallo del visibile.

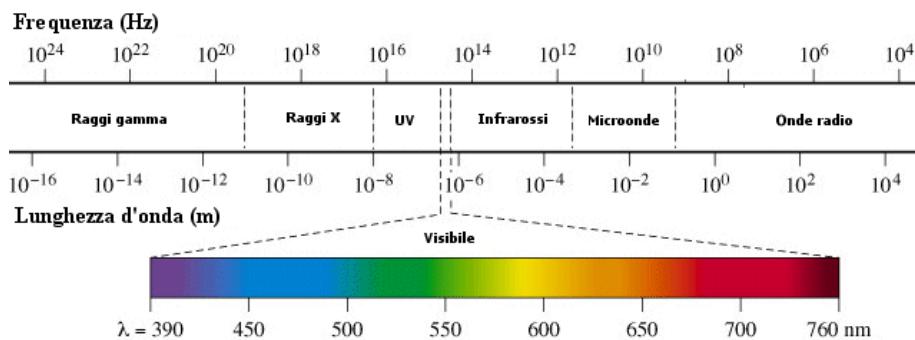


Fig.10 - Spettro delle radiazioni elettromagnetiche.

La lunghezza d'onda

Ciò che differenzia le onde elettromagnetiche tra loro è la **lunghezza d'onda**.

Poiché l'onda elettromagnetica ha andamento oscillante, la lunghezza d'onda è la distanza tra due massimi (o tra due nulli) nel grafico dell'oscillazione.

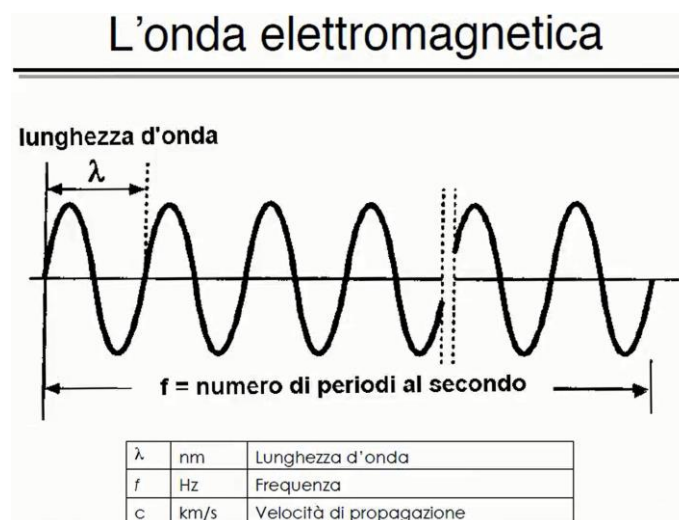


Fig.11 - Lunghezza d'onda.

A lunghezze d'onda diverse corrispondono i diversi colori che l'occhio può percepire.

La lunghezza d'onda, inoltre, distingue le onde in:

- **onde corte** (la cui lunghezza è nell'ordine dei metri e dei centimetri);
- **onde medie**;
- **onde lunghe** (lunghe fino a centinaia di metri).

Stabilito dunque che le onde elettromagnetiche coprono una vastissima gamma di lunghezze d'onda, c'è da ricordare che le onde luminose sono cortissime: le radiazioni visibili, infatti, sono comprese tra i **380 nm** e i **780 nm**.

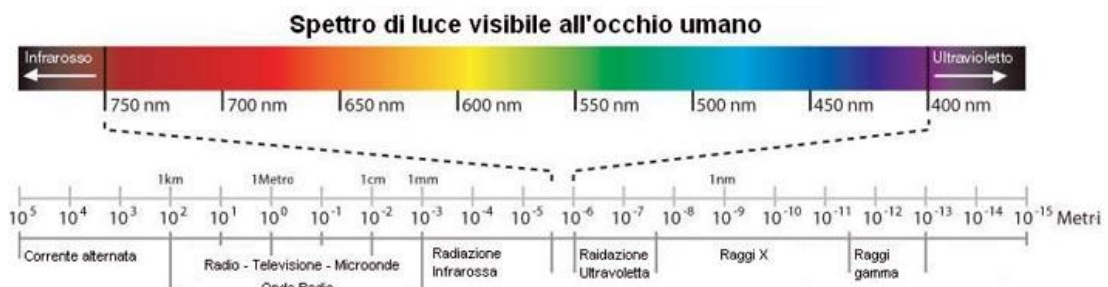


Fig.12 - Spettro delle radiazioni visibili.

Il campo delle radiazioni visibili corrisponde allo spettro dell'arcobaleno.

Dall'immagine notiamo che la luce visibile va dai toni del violetto, che corrisponde alle lunghezze d'onda più corte, ai toni del giallo verde, fino al rosso, che corrisponde alle lunghezze d'onda più lunghe.

Per lunghezze d'onda più corte dei **380 nm** siamo nel campo dell'**ultravioletto**, mentre per lunghezze d'onda maggiori dei **780 nm** siamo nel campo dell'**infrarosso**. La luce ultravioletta non è visibile, ma ha effetti molto dannosi sulla pelle, mentre la luce infrarossa, anch'essa non visibile, porta con sé una discreta quantità di energia sotto forma di calore.

Nel campo delle radiazioni visibili, l'occhio umano presenta una **diversa sensibilità alla luce in funzione della lunghezza d'onda**.

La sensibilità del nostro occhio è massima per lunghezze d'onda attorno ai **555 nm**, lunghezza che corrisponde al colore giallo-verde.

In generale, quindi, il nostro occhio è più sensibile ai colori centrali della banda delle radiazioni visibili, mentre perdiamo sensibilità procedendo sulla banda verso il rosso o il violetto, come si vede dalla curva di sensibilità.

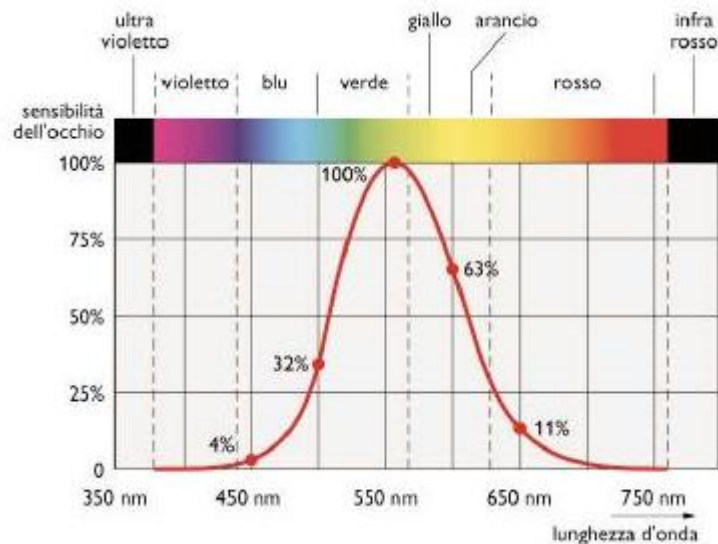


Fig.13 - Curva di sensibilità dell'occhio umano.

Questa curva, però, è verificata in condizioni di luce intensa; Quando siamo in condizioni di luce debole, per esempio di notte, la curva si sposta leggermente verso il rosso (e il colore a cui l'occhio è più sensibile diventa l'arancione intenso).

La lunghezza d'onda delle onde radio è inversamente proporzionale alla **frequenza**.

La Frequenza

Per **frequenza** si intende il numero di periodi che l'onda elettromagnetica compie in un secondo.

L'unità di misura della frequenza è l' **Hertz** (Hz).

La velocità di propagazione

La velocità di propagazione della luce è estremamente alta ed è pari a circa **300.000 km/s**.

$$c = f \cdot \lambda \quad (3)$$

Con una velocità di propagazione così alta perdono significato, dal punto di vista umano, i **fenomeni transitori**: ciò vuol dire che, a differenza del suono o del calore, quando accendiamo la luce in una stanza non riusciamo a percepire il periodo di tempo che le onde luminose impiegano per riempirla.

Le principali grandezze fotometriche

La **fotometria** è la scienza che si occupa delle radiazioni luminose visibili.

Di seguito riportiamo le **grandezze fotometriche fondamentali**, con le loro unità di misura:



Quantità di luce (lm·h)

La **Quantità di luce** è l'energia associata alla radiazione luminosa moltiplicata per la visibilità relativa media dell'occhio umano. E' espressa in **lumen-ora**.

$$\text{Visibilità relativa} = \frac{E_{\text{percepita}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (4)$$

La quantità di luce emessa da una fonte luminosa è generalmente maggiore rispetto a quella che l'occhio umano riesce realmente a percepire (secondo la curva di sensibilità), poiché generalmente, quando accendiamo una lampadina da 1 Watt, buona parte della potenza viene dispersa lungo lo spettro. Perciò si può considerare il **lumen** come il **Watt percepito dall'occhio umano**.

NB: L'unità di lumen, però, non è 1 Watt. Se irradiato alla lunghezza d'onda di 555 nm, 1 Watt produce infatti **683 lumen** (in realtà le lampade normali riescono a produrre al massimo 120 lumen per Watt).

Flusso luminoso (lumen)

L'unità di lumen rappresenta il **flusso luminoso** emesso, cioè la quantità di luce emessa da una sorgente luminosa nell'unità di tempo.

$$\Phi = \frac{E_n}{t} = I \cdot \omega \quad (5)$$

$$\Phi = [\text{cd} \cdot \text{sr}] = [\text{lm}]$$

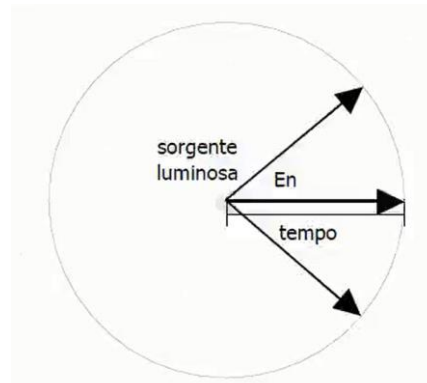


Fig.14 - Rappresentazione del flusso luminoso.

Illuminamento (lux)

Supponiamo di avere una sorgente luminosa che emette un certo **flusso luminoso** espresso in lumen. Tale flusso luminoso andrà a disperdersi su una **superficie illuminata**.

L'illuminamento è il rapporto tra la componente perpendicolare del flusso luminoso che incide su una superficie e la superficie stessa.

$$E = \frac{\Phi}{s} \cdot \cos\alpha = \frac{I}{r^2} \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

$$E = \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] = [\text{lx}]$$

Più semplicemente, l'illuminamento può essere considerato come il flusso che "cade" su una superficie, ed è perciò espresso in **lumen al metro quadro**.

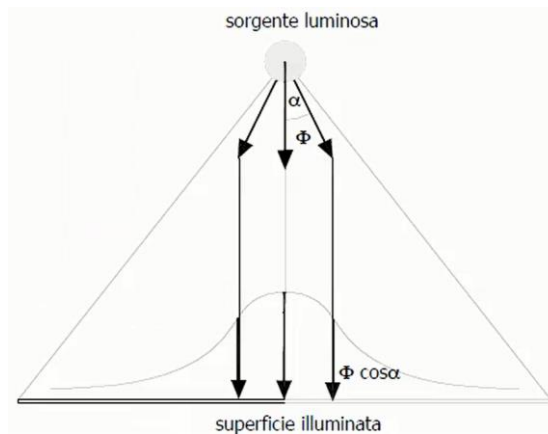


Fig.15 - Rappresentazione dell'illuminamento.

NB: il flusso luminoso non illuminerà allo stesso modo tutti i punti della superficie: se con una lampada illumino la scrivania, posso notare che sotto alla lampada ho un illuminamento più intenso, mentre man mano mi allontano l'illuminamento risulta meno intenso.

Se aumento il flusso luminoso della mia lampada, aumenta anche l'illuminamento che ottengo sulla superficie della scrivania.

Se invece avvicino la lampada alla scrivania, il flusso in lumen rimane invariato, ma la superficie diminuisce e perciò cresce l'illuminamento.

Intensità luminosa (cd)

Mentre il flusso luminoso riguarda il bulbo vero e proprio, l'intensità luminosa riguarda il **montaggio del bulbo** su un opportuno apparecchio per l'illuminazione.

L'intensità luminosa è data dal rapporto tra il flusso luminoso in lumen e l'angolo solido misurato in **steradiani** (sr) su cui il flusso insiste.

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (7)$$

$$I = \left[\frac{\text{lm}}{\text{sr}} \right] = [\text{cd}]$$



Fig.16 - Rappresentazione dell'intensità luminosa.

Rappresenta perciò la **quantità di luce emessa** da una sorgente luminosa **nell'unità di tempo e nell'unità di angolo**.

L'unità di misura dell'intensità luminosa è la **candela** (cd), cioè il flusso luminoso di 1 lumen confinato in un angolo solido di 1 steradiano.

Ciò equivale a dire che, essendo 1 steradiano circa 1/13 della sfera totale, da una lampada che emette un lumen, sulla quale è montato un paralume con un angolo solido pari a 1/13 dell'intero orizzonte sferico, si sta irradiando un'intensità luminosa di una candela.

È per questo motivo che, cambiando la forma del paralume, una stessa lampada può produrre un numero di candele diverse .

Per esempio i fari delle automobili hanno riflettori parabolici che concentrano un modesto flusso luminoso in un angolo strettissimo, ottenendo così un'intensità luminosa di migliaia di candele.

Brillanza (stilb)

La **brillanza** rappresenta il rapporto tra l'intensità di luce emessa da una sorgente luminosa planare e l'area della superficie emittente.

$$L = \frac{I}{S} \quad (8)$$

$$L = \left[\frac{\text{cd}}{\text{cm}^2} \right] = [\text{sb}]$$

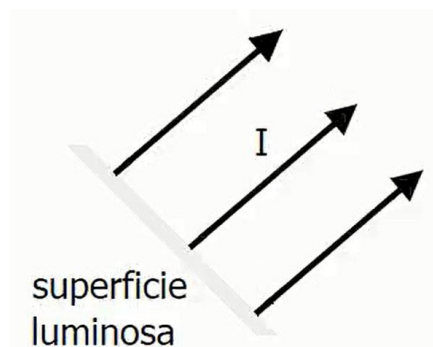


Fig.17 - Rappresentazione della brillanza.

La brillanza riguarda soprattutto le lampade a **led** o **flat**.
L'unità di misura della brillanza è lo **stilb** (sb)

Luminanza (cd/cm²)

La **luminanza** è il rapporto tra l'intensità di luce emessa da una sorgente luminosa planare in una determinata direzione e l'area della superficie perpendicolare a tale direzione (detta **superficie apparente**).

$$L = \frac{\vec{I}}{S_{app}} \quad (9)$$

$$L = \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right]$$

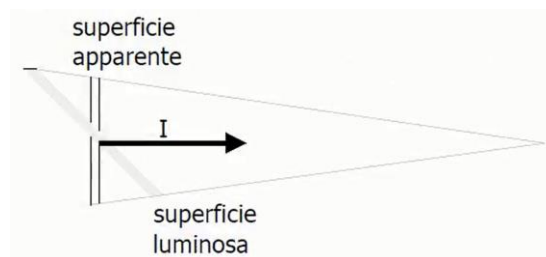


Fig.18 - Rappresentazione della luminanza.

La superficie apparente è data dalla proiezione della superficie effettiva nella direzione di osservazione.

Sostanzialmente, luminanza e brillantezza hanno lo stesso significato fisico, ma la luminanza, riferita alla superficie apparente, che è solitamente minore rispetto a quella effettiva, tende ad essere maggiore della brillantezza.

L'unità di misura della luminanza è la **candela al metro quadro**.

Luminosità o radianza (lambert)

La **luminosità** o **radianza** riguarda le superfici illuminate.

Una superficie nera, se illuminata da una sorgente, tende ad assorbire il flusso luminoso; viceversa, una superficie bianca tende a riflettere una frazione del flusso luminoso proiettato su di essa.

Pertanto la luminosità è definita come il rapporto tra il flusso luminoso diffuso da una superficie e l'area della superficie stessa.

$$R = \frac{\Phi}{S} \quad (10)$$

$$R = \left[\frac{\text{lm}}{\text{cm}^2} \right] = [\text{lambert}]$$

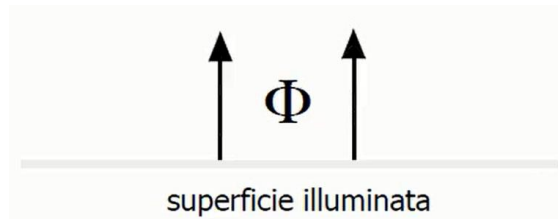


Fig.19 - Rappresentazione della luminosità.

L'unità di misura della luminosità è il **lambert**, che è dato dal rapporto tra il flusso in lumen e la superficie in cm quadrati.

Indice di resa cromatica

L'**indice di resa cromatica (IRC)** è un dato qualitativo che rappresenta in che misura la luce emessa da una sorgente luminosa ci consente di apprezzare le sfumature di colore degli oggetti illuminati.

La luce che ha la maggior resa cromatica è quella del **sole**.

IRC basso	50 - 70
IRC buono	70 - 85
IRC ottimo	85 - 100